

# Sondencharakteristiken, Raumpotentiale und Elektronengruppen des Wolframbogens

Autor(en): **Wehrli, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **3 (1930)**

Heft III-IV

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-109802>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Sondencharakteristiken, Raumpotentiale und Elektronengruppen des Wolframbogens

von M. Wehrli.

(8. V. 30.)

1. Es werden in einem Wolframbogen in Stickstoff beim Drucke 260 mm an ruhenden Sonden Sondencharakteristiken gemessen, sowohl gegen die Anode als auch gegen die Kathode. Da die Sonden dabei glühen, wird das Verhalten glühender, fremdgeheizter Sonden speziell untersucht. Gleichzeitig ergibt sich eine definitive Entscheidung über die Lage des Raumpotentiales auf der Sondencharakteristik.

2. Der aus dem Raumpotential errechnete Kathodenfall liegt dem nach der Methode der behinderten Entladung gemessenen um 22 Volt näher als der statisch ermittelte.

3. Vor der Kathode werden 3 Elektronenscharen nachgewiesen: eine primäre, translatorische, eine sekundäre mit der Elektronentemperatur  $43000^{\circ}$  K und eine weitere ungeordnete von  $11000^{\circ}$  K. In der Bogenmitte ist die primäre klein, und es zeigt sich nur eine sekundäre von  $79800^{\circ}$  K. Vor der Anode ist nur die ungeordnete Gruppe mit der hohen Temperatur von  $121000^{\circ}$  K vorhanden.

### § 1. Einleitung.

Legt man mittels einer Hilfsbatterie an eine Sonde, welche sich in einer Entladung befindet, eine veränderliche Spannung, so heisst man die Beziehung zwischen dieser Spannung und dem Strom, welcher durch die Sonde fliesst, die Sondencharakteristik. Wie I. LANGMUIR und H. MOTT-SMITH<sup>1)</sup> in einer grundlegenden Arbeit gezeigt haben, lassen sich aus diesen Sondencharakteristiken eine Menge wichtiger Schlüsse über den Entladungsmechanismus ziehen. Gleichzeitig gelingt ihnen damit die erste einwandfreie Raumpotentialmessung. Die meisten bis jetzt vorliegenden Messungen<sup>2)</sup> von Sondencharakteristiken sind bei niedrigen Drucken (kleiner als 3 mm Hg) ausgeführt. Die einzigen Messungen bei Atmosphärendruck stammen von W. B. NOTTINGHAM<sup>3)</sup>, welcher

<sup>1)</sup> I. LANGMUIR und H. MOTT-SMITH, Gen. El. Rev. **27**, 449, 538, 1924.

<sup>2)</sup> Es möge auf die zusammenfassenden Berichte verwiesen werden: A. HAGENBACH, Der elektrische Lichtbogen, Handbuch der Physik von H. GEIGER und K. SCHEEL, Bd. XIV. Berlin, Verlag Springer 1926. — R. SEELIGER und G. MIERDEL, Selbständige Entladungen in Gasen, Handbuch der Experimentalphysik von W. WIEN und F. HARMS, Bd. 13. Akademische Verlagsges. Leipzig 1929. — Ferner: K. G. EMELÉUS und W. L. BROWN: Phil. Mag. **7**, 17, 1929 (enthält weitere Literaturangaben).

<sup>3)</sup> W. B. NOTTINGHAM, Frank. Inst. J. **206**, 43, 1928; **207**, 300, 1929.

den Cadmium- und den Thalliumbogen in Argon, den Kohle- und den Kupferbogen in Luft untersucht hat. Um aber das Glühen, bezw. das Abschmelzen der Sonde, zu vermeiden, schwingt dieser Forscher die Sonde durch den Bogen mit etwa 60 cm/sek. und misst den Sondenstrom ballistisch. Diese Methode gibt naturgemäss nur einen Mittelwert des Sondenstromes und des Raumpotentiales für den ganzen Entladungsquerschnitt, und sie setzt eine sehr rasche Bildung der Ionenschichten voraus. Es gelingt W. B. NOTTINGHAM, die Resultate von I. LANGMUIR und H. MOTT-SMITH auch bei Atmosphärendruck zu bestätigen, und Raumpotentiale sowie Elektronentemperaturen zu bestimmen.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist es, Sondencharakteristiken bei hohem Drucke (etwa 200 mm) mit ruhender Sonde zu messen und zwar im Gebiete des Glimmbogens, wo der hohe Kathodenfall der Glimmentladung in den niedrigen des Bogens übergeht. Wegen der hohen Temperatur in der Entladung glüht dabei die Sonde, und es muss deshalb der schon von C. D. CHILD beobachtete Einfluss dieses Glühens quantitativ studiert werden. Wesentlich ist dabei die Frage, ob sich mit solch glühenden Sonden auch Raumpotentiale messen lassen.

## § 2. Die experimentelle Anordnung.

Der vertikale Wolframbogen besteht aus einer 1,54 mm dicken stabförmigen Kathode (vorn halbkugelförmig geschliffen) und einer Kugel vom Durchmesser 1,73 mm an einem 0,352 mm dicken Stiele als Anode. Die Kathode ist normalerweise oben. Der Glaskolben und die Herstellung der reinen, trockenen Stickstoffatmosphäre sind schon in früheren Arbeiten<sup>1)</sup> beschrieben worden. Ebenso der Betriebsstromkreis und die Prüfmethode für Schwingungen. Die übrige Schaltung ist in Fig. 1 angegeben.

Die Sonde *S* kann mittels 3 Fettschliffen an jeder Stelle der Entladung genau senkrecht und parallel zur Bogenachse verschoben werden. Ihr Abstand *Z* von der Bogenachse wird durch einen Zeiger auf einer Messingskala gemessen, ihre Entfernung von der Anode wird im 10-fach vergrösserten Projektionsbilde abgelesen. Die Sonde besteht aus Wolframdraht<sup>2)</sup> und hat 2 mittels Glimmer und Magnesia voneinander isolierte Zu-

<sup>1)</sup> M. WEHRLI, Zeitschr. f. Phys. **44**, 301, 1927 (Arbeit I); Helv. phys. acta **1**, 323, 1928 (Arbeit II).

<sup>2)</sup> Die „Licht“ A. G. von Goldau und die „Vereenigde Draadfabrieken“ von Nijmegen (Holland) stellten mir den Wolframdraht zur Verfügung, wofür ihnen hiemit speziell gedankt werden möge.

führungen, so dass sie, als Schleife ausgebildet, gegläht werden kann (*Glühsonde*). Andererseits können aber auch 2 verschieden dicke, zylindrische Sonden nacheinander an dieselbe Stelle des Bogens gebracht werden (*Doppelsonde*).

Der Betriebsstromkreis I enthält das Präzisionsvoltmeter  $U^1)$  und das Präzisionsampèremeter I.

Der Sondenmesskreis II kann mittels der Stecker 1 bis 5 gegen die Anode oder gegen die Kathode geschaltet werden.  $I_s$  ist ein Präzisionsampèremeter,  $S_i$  eine Sicherung und  $U_s$  ein Voltmeter. Wegen der vortrefflichen Stabilität und Konstanz der Entladung kann für  $U_s$  ein Wulf'sches 2-Fadenelektrometer

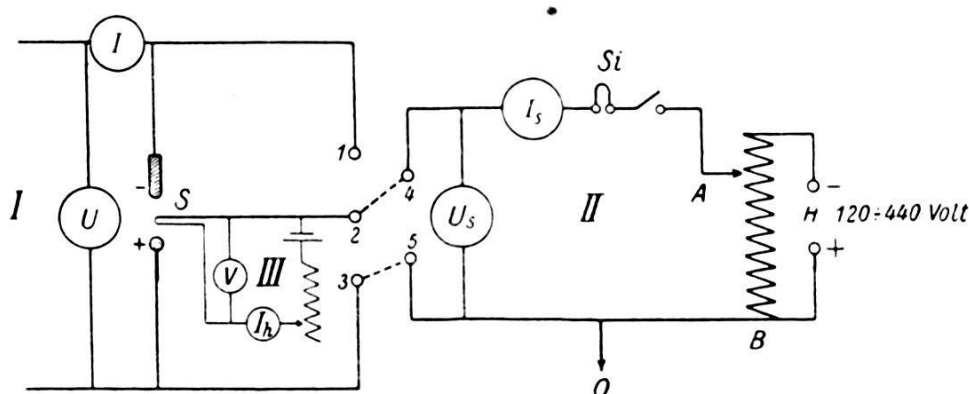


Fig. 1.

benützt werden, das gleichzeitig durch Unschärfwerden der Fäden allfällige Schwingungen in der Entladung anzeigt. Bei einzelnen Messungen wird für  $U_s$  ein elektrostatisches Multizellulard Voltmeter von HARTMANN und BRAUN oder zwischen A und B ein Präzisionsvoltmeter verwendet. Als Hilfsstromquelle H dient eine 120 Voltbatterie oder ein Generator bis 440 Volt.

Der Heizstromkreis III (in Fig. 1 dünn ausgezogen) enthält ein Präzisionsvoltmeter  $V$  und ein Ampèremeter  $I_h^2)$ . Eine Schwierigkeit bei den Messungen besteht darin, dass es stundenlang dauert, bis das thermische Gleichgewicht im Entladungskolben erreicht ist. Es wird dieses Gleichgewicht nicht vollständig abgewartet, sondern nach etwa 10 Minuten die Sondencharakteristik rasch durchgemessen. Dieses thermische Gleichgewicht hängt im übrigen noch von den Sondenströmen  $I_s$  ab, sobald diese gross werden.

<sup>1)</sup> Alle Präzisionsinstrumente sind 10-Ohminstrumente von SIEMENS und HALSKE.

<sup>2)</sup> Beim Ablesen der vielen Instrumente leisteten mir die Herren Dr. V. HARDUNG, Dr. E. MIESCHER, J. ECKERT und B. BAUMGARTNER wertvolle Hilfe, wofür ihnen hier gedankt werden möge.

§ 3. Vormessungen.

Mit der alten Sondenordnung (Arbeit II) gelang es nicht, reproduzierbare Sondencharakteristiken zu erhalten. Der Grund liegt darin, dass die von der Sonde hervorgerufenen Störungen auf eine sehr geringe Verschiebung derselben äusserst empfindlich sind. Diese Störungen werden mittels statischer Messungen quantitativ untersucht, indem die Sonde senkrecht zur Bogenachse, parallel zu sich selbst durch die Entladung bewegt wird, wobei die Gesamtspannung  $U$ , die Spannung Sonde-Kathode  $U_K$

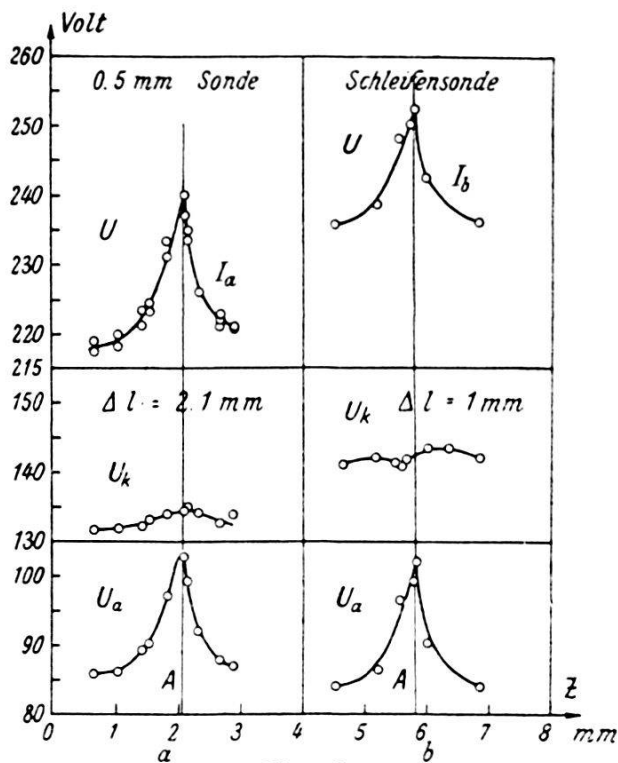


Fig. 2.

und Sonde-Anode  $U_a$  gemessen wird. Die Isolation ist dabei so gut, dass die Summe von  $U_a$  und  $U_K$  bis auf  $\pm 1\%$  dem  $U$  gleich wird. Die Resultate einer solchen Messung sind in Fig. 2 aufgetragen, als Ordinaten das  $U$ ,  $U_a$  bzw.  $U_K$  und als Abszissen die Querverschiebung  $Z$  der Sonde in mm<sup>1)</sup>. Bei  $A$  befindet sich die Sonde in der Bogenachse. Die Stromstärke ist dabei 0,30 Amp., die Bogenlänge 3 mm. Bei Fig. 2a gelangte eine 0,5 mm Sonde im Abstand  $\Delta l = 2,1$  mm von der Anode zur Verwendung, bei b eine ungeheizte Schleifensonde von 0,5 mm im Abstände  $\Delta l = 1$  mm. Diese Abstände  $\Delta l$  werden von der Sonden-

<sup>1)</sup> Die kleinen Kreise entsprechen in der ganzen Arbeit den beobachteten Punkten.

mitte aus gemessen. Der Kaltdruck  $p_0$  war bei a 227 mm, bei b 226 mm Hg, der mittlere Druck während der Messung 257 mm.

Die Kurven 1 zeigen die bekannte Steigerung der Gesamtspannung  $U$  durch das Einführen der Sonde, im vorliegenden Falle bis 9%. Das scharfe Maximum ermöglicht ein genaues Einstellen der Sonde in die Bogenachse, verursacht aber bei kleiner Verschiebung während der Aufnahme einer Sondencharakteristik einen beträchtlichen Fehler. Interessant ist dabei, dass die Ver-

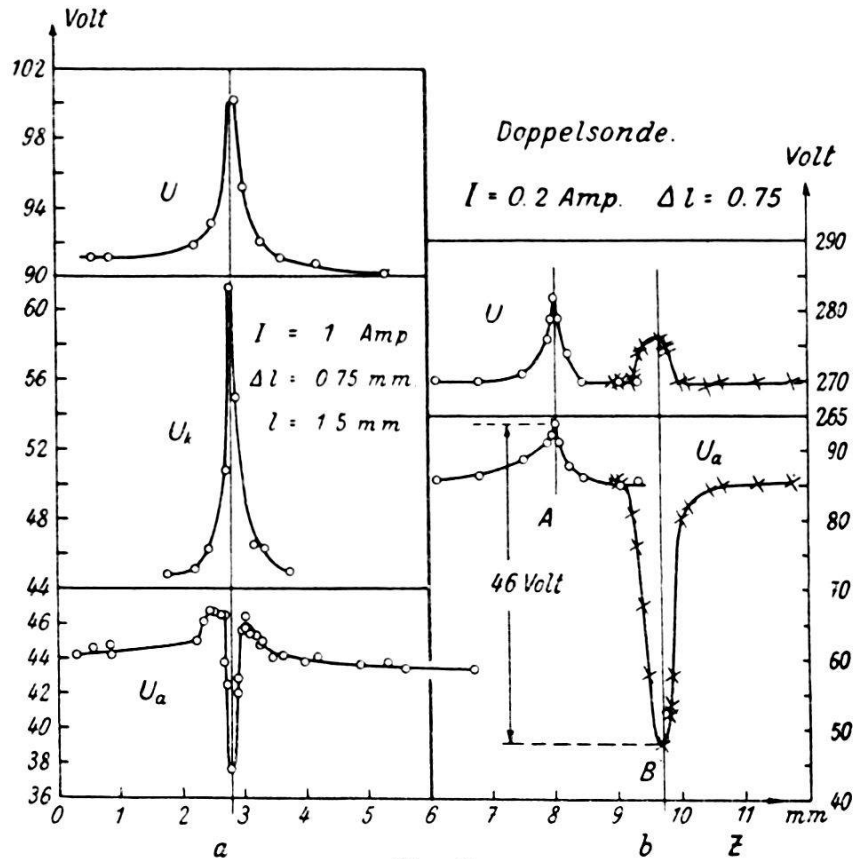


Fig. 3.

teilung dieser Störung auf  $U_a$  und  $U_K$  vollständig unsymmetrisch ist. Von dem  $\Delta U$  von 20 Volt in a fallen 18 Volt auf das  $U_a$  und nur 3 Volt auf das  $U_K$ ; in b zeigt die Grösse  $U_K$  in der Bogenachse sogar ein Minimum, so dass die  $U_a$ -Änderung die Veränderung von  $U$  übertrifft. Da ein Konvektionsstrom im Gase als Ursache dieses Verhaltens in Betracht fällt, wird auch umgepolt gemessen, bei Anode oben. Es zeigt sich keine Änderung, d. h. stets ist die  $U$ -Änderung nahezu gleich der  $U_a$ -Änderung.

Fig. 3a zeigt analoge Messungen bei  $p_0 = 229,8$  mm, der Stromstärke 1 Amp. und der Bogenlänge 1,5 mm. Die 0,5 mm dicke Sonde befindet sich dabei in der Mitte der Entladung ( $\Delta l = 0,75$  mm).

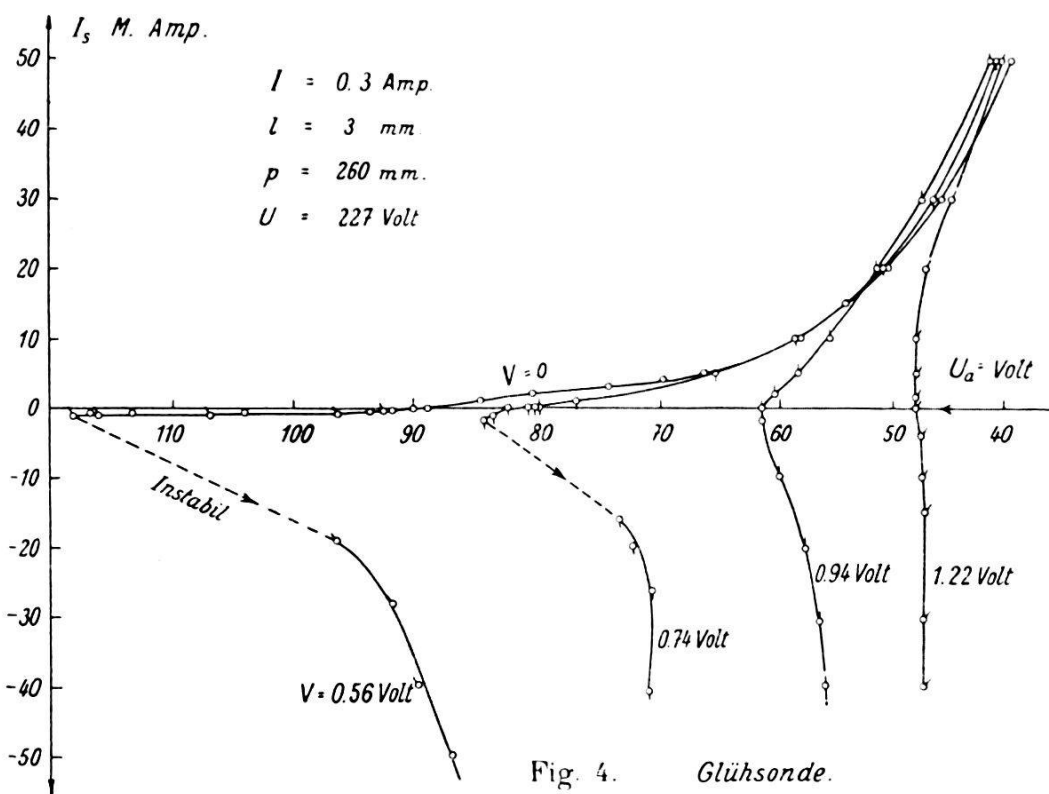
Die Gesamtspannung  $U$  zeigt wieder sehr deutlich das Maximum. Der Verlauf von  $U_K$  und  $U_a$  hat sich dagegen vollständig geändert,  $U_K$  zeigt ein scharfes Maximum und  $U_a$  ein Minimum. Es ist das der Child-Effekt, welcher von der Elektronenemission der Sonde herrührt. Wegen der grösseren Stromstärke (1 Amp. gegen 0,3 Amp. in Fig. 2) glüht die Sonde stärker, und zwar weist die Schärfe des  $U_K$ -Maximums darauf hin, dass nahe der Bogenachse ein eng begrenzter sehr heisser Teil vorhanden ist. Fügt man an die bekannte Langmuir'sche Sondencharakteristik (l. c.) einen Glühelektronenstrom, der von der Sonde ausgeht, d. h. verkleinert man das  $I_s$ , so schiebt sich der Schnittpunkt der Sondencharakteristik mit der  $U_a$ -Achse nach kleineren  $U_a$ -Werten, und man erhält in Übereinstimmung mit CHILD und mit Fig. 3a einen zu grossen Wert von  $U_K$  und einen zu kleinen von  $U_a$ . Dieser Glüheinfluss findet sich schon in der Fig. 4 der Arbeit II (l. c.), wo der Kathodenfall  $U_K$  bei 1 Amp. zu gross wird. Dass er dann bei grösseren Werten wieder tiefer liegt, rührt davon her, dass die Sonde etwas abgeschmolzen ist und nicht mehr in den heissesten Teil des Bogens eintaucht. E. BANDERET<sup>1)</sup> findet bei 4,5 Ampère im Kupferbogen nur eine Verflachung der  $U_a$ -Kurve, aber noch kein Minimum.

Ob dieses Minimum vom Glühzustande der Sonde herrührt, wird noch speziell untersucht mit einer Doppelsonde, welche zwei verschieden dicke Sonden von 0,5 und 0,2 mm enthält. Die Messungen, welche bei einer Stromstärke  $I$  von 0,2 Amp., einer Bogenlänge von 3 mm, einer Sondenstellung  $\Delta l$  von 0,75 mm und einem Kaltdrucke von 228 mm gemacht worden sind, finden sich in Fig. 3b. Die Kreise entsprechen der 0,5 mm, die Kreuze der 0,2 mm-Sonde bei genau denselben Bedingungen. Bei  $A$  ist die dicke, bei  $B$  die dünne Sonde an der gleichen Stelle in der Bogenachse. Die Gesamtspannung  $U$  hat bei beiden Sonden das Maximum, welches für die dünne Sonde um 6 Volt tiefer liegt. Ganz verschieden verhalten sich die  $U_a$ -Werte. Bei der 0,5 mm-Sonde zeigt sich ein zu  $U$  analoges Maximum, bei der 0,2 mm-Sonde ein Minimum, das den hohen Wert von 38 Volt erreicht. Man kann also an derselben Stelle des Bogens um 46 Volt verschiedene  $U_a$ -Werte erhalten, je nach dem Glühzustande der Sonde. Die dünne Sonde zeigt eine kleinere  $U$ -Störung, dagegen wegen der kleineren Wärmeableitung einen sehr starken Glüheinfluss. Der beträchtliche Temperaturunterschied der 2 Sonden kann auch im Projektionsbilde leicht erkannt werden.

<sup>1)</sup> E. BANDERET, Verh. der Nat. Ges. Basel **23**, 28, 1912.

§ 4. Sondeneigenschaften mit der Glühsonde.

Eine Bestätigung des grossen Glüheinflusses bei den statischen Messungen wird erhalten bei der Untersuchung der Sondeneigenschaften mit einer fremd geheizten Sonde (Glühsonde) von 0,5 mm Durchmesser. Die Messungen erfolgen gegen die Anode, wobei sich die Sonde in der Bogenachse befindet. Nach dem Einstellen der Heizstromstärke  $I_H$  wird zuerst statisch gemessen, dann rasch die ganze Sondeneigenschaft aufgenommen und schliesslich wieder der statische Wert nachkontrolliert, der höch-



stens 1 Volt vom Anfangspunkt abweichen darf. In Fig. 4 sind die Resultate aufgetragen, als Abszissen die Spannung Sonde-Anode  $U_a$ , als Ordinate der Sondenstrom  $I_s$  in Milliamp., der in die Entladung hineinfliesst.

Die Stromstärke  $I$  beträgt dabei 0,3 Amp., die Bogenlänge 3 mm, die Sondendistanz  $\Delta l$  0,5 mm von der Anode (unten). Die Heizspannung  $V$  an der Sonde ist bei den einzelnen Kurven angeschrieben, sie variiert von 0 bis 1,22 Volt. Wegen dem Spannungsabfall längs der Sonde sind die  $U_a$ -Werte um  $V/2$  korrigiert. Die maximale Heizstromstärke  $I_H$  ist 13 Amp. Bei den hohen  $I_s$  (grösser als 20 Milliamp.) wird die gegenseitige



Lage der Sondencharakteristiken speziell untersucht, indem bei einem bestimmten  $I_s$ -Wert die Heizspannung geändert wird. Es wird dabei eine Kreuzung der Kurven gefunden. Die Gesamtspannung  $U$  beträgt 227 Volt, der Kaltdruck  $p_0$  229 mm und der Druck  $p$  während der Messung 270 mm.

Man hat bei den Sondencharakteristiken zwei Arten zu unterscheiden: solche, bei denen keine Zündung der Sonde als Kathode erfolgt (bis  $U_a = 120$  Volt) und andere, bei welchen die Sonde zündet. Zu den ersten gehört die Sondencharakteristik

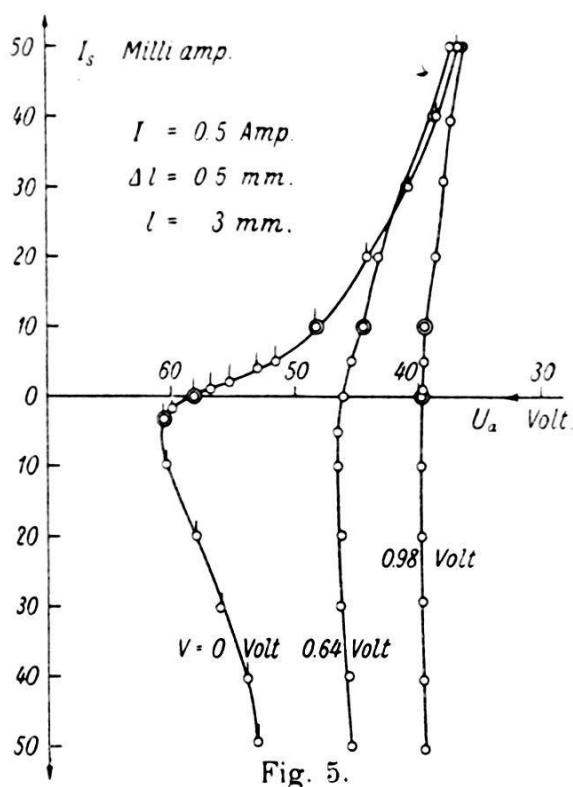


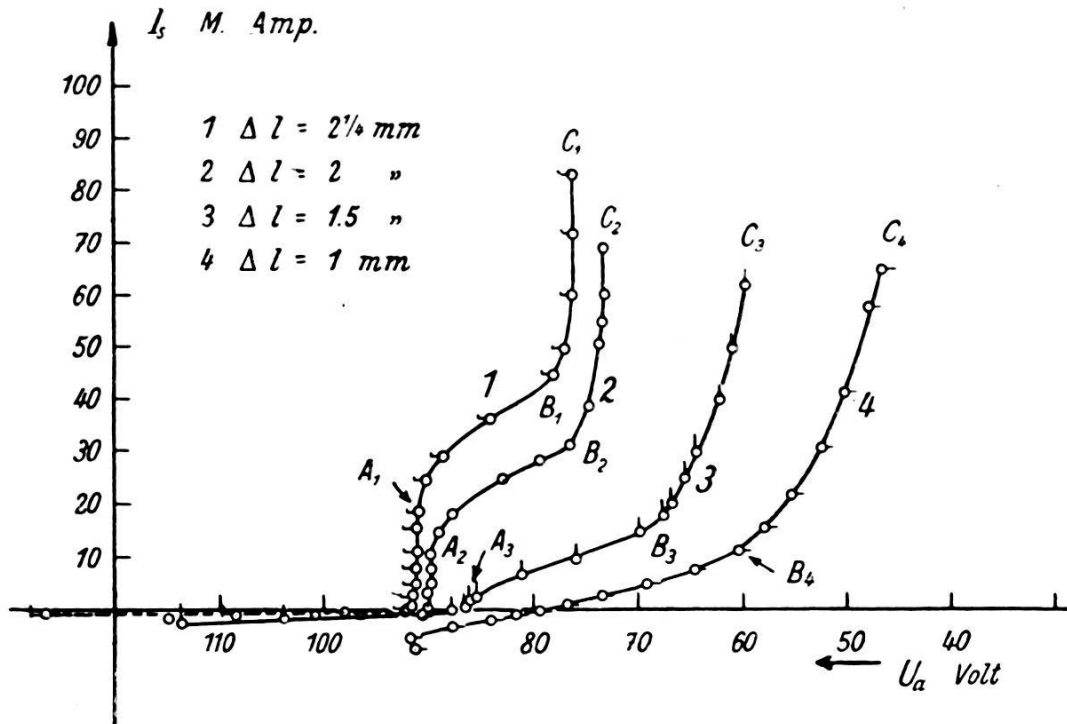
Fig. 5.

für  $V = 0$  und jene mit kleinem  $V$ , welche von der erstern nur sehr wenig abweichen. Bei  $V = 0,56$  Volt und den höheren Werten erfolgt eine Zündung. Die gestrichelten Kurventeile sind dabei instabil. Es scheinen auf dieser Sondencharakteristik analoge Stabilitätsbedingungen zu herrschen wie die bekannten von KAUFMANN angegebenen, bei der Zweielektrodenentladung; denn die schwächer geneigten Sondencharakteristiken werden auch hier stabil. Der Glüheinfluss längs der  $U_a$ -Achse erreicht den hohen Wert von 43 Volt. Eine analoge Kurvenschar für die Stromstärke  $I = 0,5$  Amp. ist in Fig. 5 angegeben.

Hier ist die Sonde von vorneherein schon so heiss, dass stets stabile Zündung erfolgt, es fehlen die Kurven mit kälterer Sonde.

§ 5. Sondencharakteristiken bei verschiedenen Abständen  $\Delta l$  zwischen Sonde und Anode.

Alle weiteren Messungen werden bei der Stromstärke 0,3 Amp.<sup>1)</sup> und der Bogenlänge 3 mm ausgeführt, wobei sich die Sonde stets in der Bogenachse befindet. Fig. 6 enthält 4 Sondencharakteristiken, welche bei konstanten Bedingungen rasch nacheinander gemessen worden sind und zwar zwischen Sonde und Anode ( $U_a$ ).



$I = 0.3 \text{ Amp.}$      $l = 3 \text{ mm}$      $U = 222 \text{ Volt}$   
 $p_0 = 229$      $p = 260 \text{ mm.}$

Fig. 6.

Der Kaltdruck  $p_0$  ist dabei 229 mm, der mittlere Druck  $p$  während der Messung 260 mm und die Gesamtspannung  $U$  mit eingeführter Sonde 222 Volt. Die angegebenen Kurvenscharen sind jeweils durch eine grössere Zahl von Messungen (im ganzen 95 Kurvenblätter) sichergestellt. In Fig. 6 sind die Abstände  $\Delta l$  der Sonde von der Anode angegeben. Die Kurven zeigen eine typische Vierteiligkeit: bei grossen  $U_a$  den bekannten flachen Verlauf, herrührend vom positiven Ionenstrom, der gegen die Sonde fliesst, dann einen steilern Anstieg bis  $A$ , einen flachern bis  $B$  und einen steilern bis  $C$ . Je weiter man von der Kathode

<sup>1)</sup> Diese Stromstärke ist so gewählt, dass die 0,5 mm dicke Sonde noch keinen Glüheffekt zeigt.

abrückt, desto geringer wird der erste Anstieg. Eine ganz analoge Kurvenschar ergibt sich auch bei umgepolter Entladung. Dabei wird die untere Kugelelektrode zur Kathode, was bekanntlich nach WEHRLI (l. c.) wegen der geringern Wärmeableitung eine starke Spannungsabnahme des Kathodenfalles bewirkt. Die Gesamtspannung  $U$  fällt dabei auf den Wert 156 Volt (statt 222 Volt). Die Vierteiligkeit der Sondencharakteristiken bleibt erhalten, nur ist der erste Anstieg bis  $A$  bei demselben  $\Delta l$  wesentlich kleiner.

### § 6. Die Lage des Raumpotentiales.

Zur Interpretation der Sondencharakteristiken in Fig. 6 ist es vor allem notwendig, die Lage des Raumpotentiales zu kennen, d. h. den Punkt auf der Sondencharakteristik zu wissen, in welchem die an der Sonde gemessene Spannung mit dem wahren Potential am Ort der Sonde übereinstimmt. Es gibt dafür zwei Möglichkeiten:

a) Das Raumpotential liegt nahe an den Punkten  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$ . Vergleicht man z. B. die Kurve 1 mit der klassischen Langmuir'schen<sup>1)</sup> Sondencharakteristik oder mit derjenigen von W. B. NOTTINGHAM<sup>2)</sup>, so erscheint das sehr natürlich. Die Abweichung des Raumpotentiales vom statischen Wert  $U_a$  (bei  $I_s = 0$ ) wäre damit sehr klein (im Maximum 3 Volt).

b) Das Raumpotential liegt bei noch kleinern  $U_a$ -Werten als die Punkte  $C_1$ ,  $C_2 \dots$ , d. h. bei sehr grossen  $I_s$ -Werten. In diesem Falle weichen die Raumpotentiale sehr beträchtlich von den statischen Messungen ab. Bei Kurve 4 mehr als 32 Volt.

Interessanterweise gibt der Kurvenverlauf (Vierteiligkeit) darüber keine Entscheidung. Beide Fälle sind möglich. Im ersten Falle (a) werden die Elektronen von  $A$  an (nach rechts) gegen die Sonde beschleunigt, die Punkte  $B_1$  bis  $B_4$  würden dann den Punkten entsprechen, wo die Ionisation einsetzt; tatsächlich entsprechen die Spannungsdifferenzen ( $A_1 - B_1$ ), ( $A_2 - B_2$ ) nahezu der Ionisierungsspannung des Stickstoffes<sup>3)</sup> (16 Volt). Im zweiten Falle (b) würden die verschiedenen Kurventeile verschiedenen Elektronenscharen entsprechen. Solche Scharen mit entsprechendem Kurvenverlauf sind von I. LANGMUIR<sup>4)</sup> im Quecksilber-

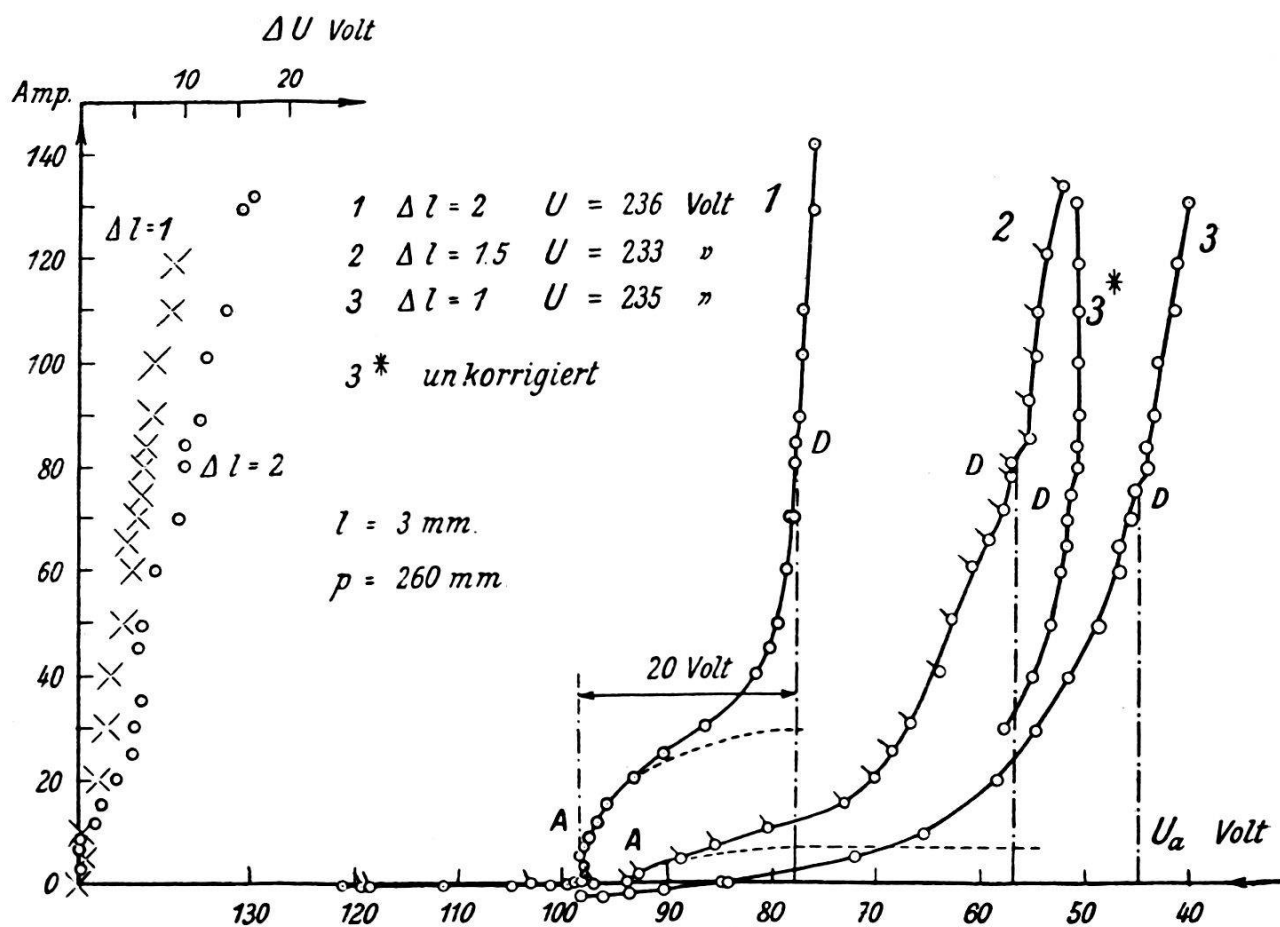
<sup>1)</sup> l. c. S. 540, od. bei SEELIGER (l. c.) S. 461.

<sup>2)</sup> l. c. 206, 45, 1928 (Fig. 1).

<sup>3)</sup> Vergleiche ganz entsprechende Kurvenscharen und ihre Interpretation bei J. M. BENADE and K. T. COMPTON, Phys. Rev. 11, 184, 1918 (Fig. 4).

<sup>4)</sup> I. LANGMUIR, Phys. Rev. 26, 585, 1925 (Fig. 1).

dampf entdeckt worden. Die primären Elektronen stammten dabei aus einer Glühkathode, und der Druck war im Maximum 0,006 mm. Ähnliche Elektronengruppen finden auch K. G. EMELÉUS und W. L. BROWN (l. c.) in der Glimmentladung von Ar, Ne, H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> bei etwa 1 mm Druck. Diese Resultate auf Drucke von 260 mm und die Bogenentladung in N<sub>2</sub> auszudehnen, erscheint unstatthaft, um so mehr, da W. B. NOTTINGHAM beim Bogen keine solchen Elektronengruppen findet, und die Lang-



Korrigierte Sondencharakteristiken  $I = 0.3 \text{ Amp.}$

Fig. 7.

muir'schen Betrachtungen nur für Distanzen, welche klein sind im Verhältnis zur mittleren freien Weglänge der Elektronen, Gültigkeit beanspruchen. Die wichtige Frage über die Lage des Raumpotentials muss deshalb experimentell entschieden werden. Zu diesem Zwecke werden die Messungen der Sondencharakteristiken in das Gebiet höherer Stromstärken  $I_s$  ausgedehnt. Dabei fallen die  $I_s$  in die Größenordnung der Gesamtstromstärke  $I$  (300 Milliamp.), und es ist notwendig, Korrekturen an den Messwerten anzubringen. Da beim Glimmbogen der Kathodenfall sehr

stark von der Stromstärke  $I$  abhängt, wird gemäss der Schaltung in Fig. 1 die Stromstärke gegen die Kathode konstant gehalten. Der Strom, welcher dann zwischen Sonde und Anode fliesst, ist  $I - I_S$ , d. h. er nimmt mit wachsendem  $I_S$  ab. Dadurch steigt mit dem  $I_S$  die Spannung Sonde-Anode  $U_a$ , und die gemessenen  $U_a$ -Werte sind deshalb zu gross. Diese Spannungssteigerung  $\Delta U_a$  muss sich in der Gesamtspannung  $U$  bemerkbar machen, und das ist tatsächlich auch der Fall. Es wird deshalb gleichzeitig mit den Punkten der Sondencharakteristiken die Gesamtspannung  $U$  abgelesen, die mit  $I_S$  wächst. Die  $U_a$ -Werte der Sondencharakteristiken werden dann um die Zunahme  $\Delta U$  der Gesamtspannung vermindert. Solche korrigierten Sondencharakteristiken sind in Fig. 7 aufgetragen.

Gleichzeitig werden die gemessenen  $\Delta U$ -Werte für die Sondenabstände  $\Delta l$  von 1 und 2 mm als Funktion von  $I_S$  angegeben. Bei 100 Milliamp. beträgt z. B. die Korrektur im ersten Falle 7,5, im zweiten 12,5 Volt. Die Kurve 3\* ist die unkorrigierte von 3. Man erkennt daran die allgemeine Feststellung, dass die unkorrigierten Punkte weniger streuen als die korrigierten.

Ergibt sich bei höheren Stromstärken  $I_S$  auf den Sondencharakteristiken eine Unstetigkeit, welche dem Raumpotential entsprechen könnte? Ja, und zwar weisen die Kurven in den Punkten  $D$  einen schwachen Knick auf. Er ist im allgemeinen bei den korrigierten Kurven ausgeprägter als bei den unkorrigierten. Um darüber weiteren Aufschluss zu erhalten, werden noch Sondencharakteristiken gegen die Kathode ausgeführt. Hierbei müssen nämlich keine Korrekturen angebracht werden, da ja zwischen Sonde und Kathode stets der konstante Strom  $I$  fliesst. Dagegen zeigen sich andere Nachteile. Die Spannung Sonde-Kathode  $U_K$  ist stets bedeutend grösser als das  $U_a$ . Deshalb muss als Hilfsstromquelle ein 440 Volt-Generator verwendet werden, da sonst instabile Verhältnisse auftreten. Andererseits gibt dieser Generator mit steigendem  $I_S$  immer mehr Leistung, nämlich  $U_K I_S$  Watt an die Entladung ab, so dass zur Konstanthaltung von  $I$  ein Teil der Hauptstromquelle abgeschaltet werden muss. Dieses beträchtliche Nachregulieren bedingt ein Schwanken der Entladungsbedingungen, was sich in dem Streuen der  $\Delta U$ -Werte äussert (s. Fig. 8). In Fig. 8 sind zwei so gemessene Sondencharakteristiken aufgetragen, als Abszissen die Spannung  $U_K$ , als Ordinate die Stromstärke  $I_S$ . Dabei gelangen die  $\Delta U$ -Werte nicht zur Verwendung, wie noch speziell erwähnt werden möge.

Man erkennt den Knick  $D$  bei beiden Kurven deutlich. Vergleicht man die Kurve 2 der Fig. 7 mit der entsprechenden Kurve 1

der Fig. 8, so erkennt man, wie erwartet, den ganz analogen Verlauf. Der Knick *D* liegt in beiden Kurven bei dem Strome 80 Milliamp. In der Kurve 2 der Fig. 8 ist *D* bei 73 Milliamp., in der entsprechenden Kurve 3 der Fig. 7 bei 75 Milliamp., also in guter Übereinstimmung. Allfällige kleine Abweichungen der zugehörigen Kurven sind nach § 3 leicht zu verstehen aus der verschiedenen Sondenstellung. Diese Verschiedenheit äussert sich schon in den verschiedenen Gesamtspannungen *U*, die jeweils in

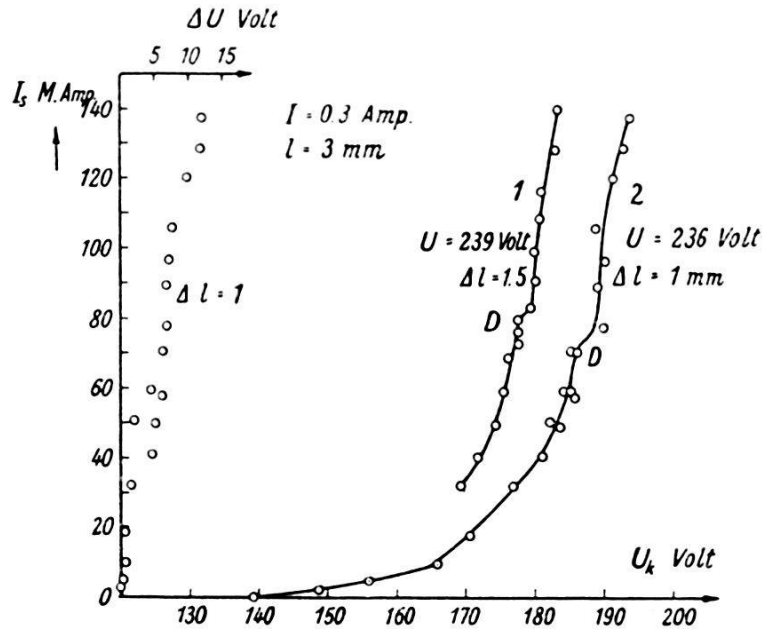


Fig. 8.

den Figuren angegeben sind. Die Frage über das Raumpotential lautet jetzt präziser: Liegt das Raumpotential in den Punkten *A* oder *D*?

### § 7. Experimenteller Entscheid über die Lage des Raumpotentiales.

Dieser Entscheid wird mit der Methode der fremdgeheizten Glühsonde, welche schon von I. LANGMUIR (l. c.) erwähnt worden ist, gefällt.

Bei dieser Methode vergleicht man die Sondencharakteristik einer kalten bzw. schwach glühenden Sonde mit der Sondencharakteristik derselben Sonde, wenn sie durch Fremdheizung stark geglüht wird. Im letzten Falle emittiert die Sonde einen Elektronenstrom, welcher nur dann in merklichem Betrage abfließen kann, wenn das Sondenpotential niedriger ist als das Raumpotential, d. h. wenn die Sonde negativ relativ zum umliegenden Gase ist. So lange das Sondenpotential höher als das

Raumpotential ist, werden die Glühelektronen an der Sonde durch das Gegenfeld zurückgehalten, und die beiden Sondencharakteristiken fallen zusammen. Beim Raumpotential kehrt das Feld um, und es wird jetzt die Charakteristik der glühenden Sonde von derjenigen der kalten abzweigen, d. h. das Raumpotential liegt nahe<sup>1)</sup> am Verzweigungspunkte der beiden Sondencharakteristiken. In Fig. 9a sind die beiden möglichen Fälle des

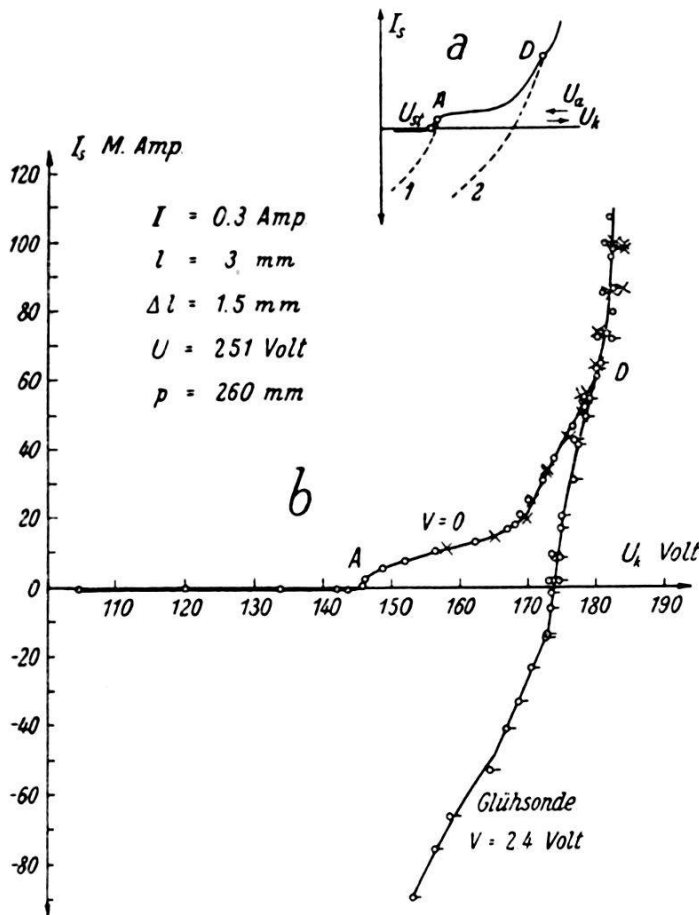


Fig. 9.

Raumpotentiale  $A$  und  $D$  angegeben. Die ausgezogene Kurve ist dabei die Sondencharakteristik der schwach glühenden Sonde. Die gestrichelten Kurven sind die erwarteten Sondencharakteristiken mit stark geheizter Sonde und zwar 1, wenn das Raumpotential in  $A$ , 2, wenn es in  $D$  ist. Im ersten Falle liegt der Verzweigungspunkt nahe am statisch gemessenen Potential  $U_{st}$ . Solche Messungen mit geglühten Sonden enthalten die Figuren 4 und 5. Die Schnittpunkte der Charakteristiken liegen darin

<sup>1)</sup> Wegen der Anfangsgeschwindigkeit der Glühelektronen können diese auch ein kleines Gegenpotential überwinden. Da es sich aber bei den Sondencharakteristiken um Ströme von mehreren Milliamp. handelt, wird die Abweichung von Raumpotential und Verzweigungspunkt im Maximum 2 Volt sein; denn die Sondentemperatur liegt stets unterhalb  $3600^\circ \text{ K}$ .

bei viel kleineren  $U_a$ -Werten als das statische  $U_a$ , und diese Messungen sprechen deshalb für das Raumpotential in  $D$ . Wegen der Wichtigkeit der Frage werden aber noch weitere Experimente ausgeführt, die ins Gebiet höherer  $I_s$ , über die Punkte  $D$  hinaus reichen. Dabei zeigt sich eine neue Schwierigkeit bei Anbringung der Korrekturen  $\Delta U$ . Diese hängen ab von der Heizstromstärke der Sonde, d. h. die Gesamtspannung  $U$  nimmt ab mit wachsender Heizstromstärke. Daraus folgt, dass die Energie, welche die Sonde der Entladung entzieht, bei kalter Sonde grösser ist als bei heisser. Die so entstehende Differenz von  $\Delta U$  kann 5 Volt übersteigen<sup>1)</sup>. Zur Festlegung der gegenseitigen Lage der Sondencharakteristiken ist deshalb die Messung zwischen Sonde und Kathode ( $U_K$ ) vorzuziehen, da hierbei überhaupt keine  $\Delta U$ -Korrekturen nötig sind. Eine solche Messung mit 0,5 mm dicker Glühsonde im Abstände 1,5 mm von der Anode ist in der Fig. 9b aufgezeichnet.

Zuerst wurden dabei mit ungeheizter Sonde ( $V = 0$ ) die Kreise gemessen und dann mit geheizter die  $\circ$ — und schliesslich zur Kontrolle mit ungeheizter Sonde die Kreuze. Die Heizspannung an der heissen Sonde war 2,4 Volt<sup>2)</sup>, was eine Korrektur der  $U_a$ -Werte um 1,2 Volt bedingt. Fig. 9b enthält die korrigierte Kurve. Sie trifft die Kaltkurve im Punkte  $D$  und läuft 29 Volt neben  $A$  vorbei. Vergleicht man Fig. 9a mit b, so sieht man, dass die Messung definitiv für den Fall 2 entscheidet.

Ähnliche Resultate erhält man auch bei den Sondenstellungen  $\Delta l$  von 1 und  $2\frac{1}{4}$  mm.

Damit ergibt sich das *Resultat*: Das Raumpotential liegt sicher nicht im Punkte  $A$ , sondern nahe am Punkte  $D$ .

### § 8. Die Zündung der Sonde als Anode.

Man kann die Sondencharakteristiken gegen die Anode ( $U_a$ ) soweit verfolgen, bis die Hilfsbatterie ausgeschaltet ist. Dann fliesst der ganze Betriebsstrom  $I$  durch die Sonde in die Ent-

<sup>1)</sup> Die Kreuzungspunkte der Sondencharakteristiken in Fig. 4 sind deshalb kaum reell, sondern sie dürften bei Anbringung der Korrektur  $\Delta U$  wegfallen, weil dabei die Charakteristiken der kälteren Sonden mehr nach rechts rücken als die der heissen.

<sup>2)</sup> Da die zugehörige Heizstromstärke 15 Amp. beträgt, kann man vermuten, dass eine Störung durch das vom Strom bedingte Magnetfeld entsteht. Weil dieser Einfluss proportional mit dem Heizstrom zunimmt, kann er vom exponentiellen Glühelektroneneffekt getrennt werden. Eine spezielle Untersuchung zeigt, dass er im Maximum 1,4 Volt beträgt, was zur Entscheidung der Lage des Raumpotentials ohne Belang ist.



ladung ( $I = I_s$ ). Die Sonde ist zur Anode einer um  $\Delta l$  kürzern Entladung geworden, und die alte Anode wird ausgeschaltet. Eine solche vollständige Sondencharakteristik gegen die Anode für  $\Delta l = 1,5$  findet sich in Fig. 10.

1 ist die beobachtete, 2 die um  $\Delta U$  korrigierte Kurve. Wie man erkennt, nimmt die beobachtete Spannung zwischen Sonde und Anode wegen der Abnahme von  $I - I_s$  zu bis  $I = 0,25$  Amp.,

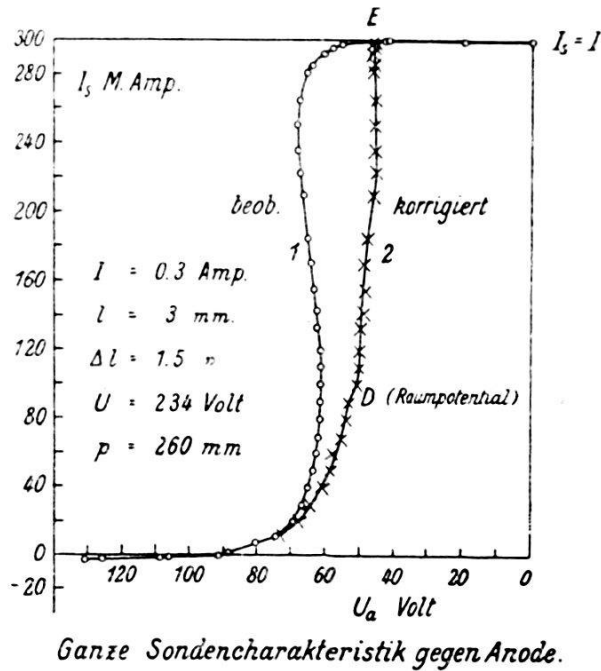


Fig. 10.

d. h. erst wenn der Sondenstrom  $\frac{5}{6}$  des Betriebsstromes  $I$  erreicht, beginnt die  $U_a$ -Abnahme gegen Null. Die korrigierte Kurve erreicht den Wert  $I_s$  von 0,3 Amp. in  $E$ . Im Gebiete  $D-E$  bildet sich der Anodenfall der neuen Entladung aus, der den kleinen Wert von etwa 5 Volt<sup>1)</sup> erreicht.

### § 9. Die Sonde als Kathode.

Wenn der Sondenstrom negativ ist, fließt zwischen Anode und Sonde der Strom  $I + I_s$ , und die Spannung  $U_a$  wird zu klein. Dadurch erklärt sich der Unterschied im Verlauf der Sondencharakteristiken der Fig. 4 und 9 im Gebiete negativer  $I_s$ . Um richtige Kurven dieses Gebietes ohne Korrektion zu erhalten,

<sup>1)</sup> Dieser kleine Wert dürfte mit der dünnen Anodenform in Zusammenhang stehen. (Vergleiche den Energiesatz bei M. WEHRLI, Helv. phys. acta **1**, 449, 1928.)

wird das Ampèremeter  $I$  auf die Anodenseite verlegt, und der Anodenstrom konstant gehalten. Es ergeben sich so die Sondencharakteristiken der Fig. 11.

Dabei gelangt eine 0,5 mm Glühsonde bei den Heizspannungen  $V$  zur Verwendung. Man erkennt daran das Ergebnis, dass die

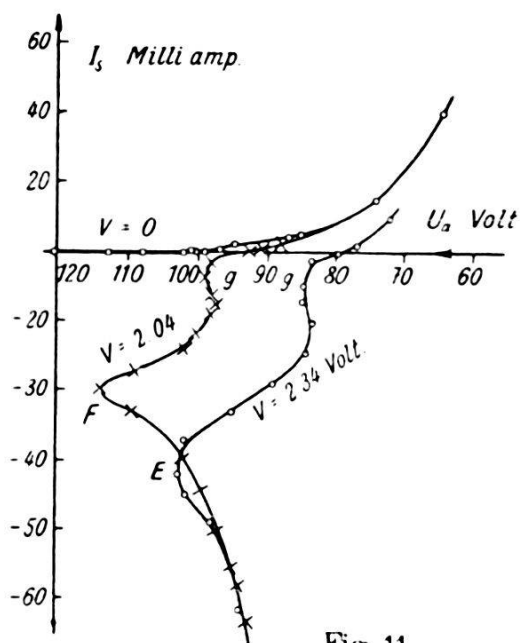


Fig. 11.

$$I = 0,3 \text{ Amp.} \quad l = 3 \text{ mm} \quad \Delta l = 1 \text{ mm} \quad U = 250 \text{ Volt} \quad p = 260 \text{ mm.}$$

Charakteristiken im negativen  $I_s$ -Gebiete 2 Maxima aufweisen  $F$  und  $G$ , welche annähernd um das Ionisationspotential des  $N_2$  (16 Volt) auseinander liegen. Die Zündung der Sonde als Kathode erfolgt stufenweise.

### § 10. Die Raumpotentiale.

Aus der Lage des Raumpotentiales in den Punkten  $D$  (s. z. B. Fig. 7) ergeben sich die Folgerungen:

Das Verhalten der Elektronen im Glimmbogen von  $N_2$  bei einem äusseren Drucke von 260 mm entspricht der von I. LANGMUIR untersuchten Zerstreuung der Elektronen einer Glühkathode in Hg-Dampf bei 0,001 mm Druck. Auch an der Sonde herrschen analoge Verhältnisse.

Es lassen sich mit glühender Sonde Raumpotentiale messen; denn die Sonden waren in der vorliegenden Arbeit stets glühend. Die statischen Sondenmessungen der glühenden Sonden liegen näher am Raumpotential als diejenigen von kalten Sonden. So sind in Fig. 3 die tiefen Minima der  $U_a$ -Werte dem Raumpotential

am nächsten, im Gegensatz zur bisherigen Auffassung. Die ermittelten Raumpotentiale sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1 (Raumpotentiale).**

$I = 0,3$  Amp.  $l = 3$  mm.

Nr.	$U_{\text{Volt}}$	$\Delta l$ mm	Raumpotentiale		Mess- art	Fig.	$U_{st}$	$D-U_{st}$
			$D^-$	$D^+$				
1	228	1	186	42	$U_K$	8	139	47
2	235	1	190	45	$U_a$	7	84	39
3	237	1,5	178	59	$U_K$	—	—	—
4	239	1,5	178	61	$U_K$	8	—	—
5	233	1,5	176	57	$U_a$	7	94	37
6	234	1,5	181	53	$U_a$	10	92	39
7	251	1,5	180	71	$U_K$	9	146	34
8	236	2	158	78	$U_a$	7	99	21
9	239	2	158	81	$U_K$	—	135	23
10	232	1	188	44	} Mittelwerte . . {			43
11	236	1,5	178	57				37
12	237	2	158	79				22

Die zweite Kolonne enthält die Gesamtspannung  $U$ , mit eingeführter Sonde, Kolonne 3 den Abstand der Sonde von der Anode, Kolonne 4 und 5 die Raumpotentiale  $D$  gegen Kathode bzw. Anode. Die Genauigkeit der Mittelwerte dürfte  $\pm 5$  Volt sein. Kolonne 6 gibt die Messart an, d. h. ob die zu Grunde gelegte Sondencharakteristik gegen die Anode ( $U_a$ ) oder gegen die Kathode ( $U_K$ ) aufgenommen worden ist. Der andere Wert des Raumpotentiales ist jeweils die Differenz gegen  $U$ . Kolonne 7 gibt die Figur an, in der sich die zugehörige Sondencharakteristik befindet.  $U_{st}$  sind die statischen Werte, und in der letzten Kolonne finden sich die Differenzen der Raumpotentiale  $D$  und der  $U_{st}$ -Werte. Der grösste Wert ist dabei 47 Volt; im allgemeinen wird die Abweichung immer kleiner, je näher die Sonde an die Kathode heranrückt. Dieses Verhalten ist in Übereinstimmung mit dem Befunde von W. B. NOTTINGHAM im Kohlebogen. Die Messung Nr. 7 zeigt einen besonders hohen  $U$ -Wert. Derselbe rührt davon her, dass eine Schleifensonde verwendet worden ist, welche dem Bogen viel mehr Energie entzieht als die bei allen andern Beobachtungen benützte Stabsonde. Man sieht auch hier, dass nur die Spannung gegen die Anode wächst (bis 71 Volt), während der Betrag gegen die Kathode 180 Volt bleibt. Aus den Raumpotentialen lässt sich der *Kathodenfall* berechnen, wenn der

Spannungsabfall in der Gassäule bekannt ist. Letzteren kann man in roher Näherung der Neigung der Spannungs-Bogenlängen-Kurve gleichsetzen. Es wurde deshalb sofort nach den Sondencharakteristiken bei der konstanten Stromstärke 0,3 Amp., die  $U$ - $l$ -Kurve gemessen, welche in der Fig. 12 aufgetragen ist.

Die Neigung bzw. der Spannungsabfall in der Gassäule  $\frac{dU}{dl}$  ergibt sich daraus zu 15,4 Volt/mm. Zählt man diesen Wert vom Raumpotential Nr. 12 in Tabelle 1, welches 1 mm vor der Kathode bestimmt worden ist, ab, so ergibt sich der Kathodenfall zu 143 Volt, ein Wert, der auf  $\pm 15$  Volt genau sein dürfte.

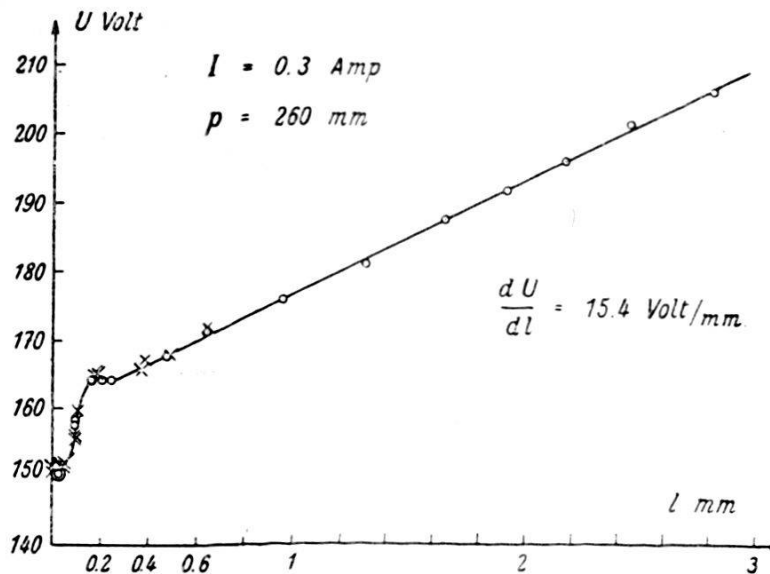


Fig. 12.

Dieser Kathodenfall soll verglichen werden mit dem Minimalwerte der  $U$ - $l$ -Kurve, nach der Methode der behinderten Entladung<sup>1)</sup>. P. BÄCHTIGER<sup>2)</sup> konnte nämlich zeigen, dass diese Methode auch beim Lichtbogen möglich ist. Er misst im Druckbereiche von 49 bis 490 mm bei sehr kleinen Bogenlängen  $U$ - $l$ -Kurven und zwar bis 1,2 Amp. Diese Kurven entsprechen in ihrem Verlaufe vollständig denjenigen, welche A. GÜNTHERSCHULZE (l. c.) bei der Glimmentladung festgestellt hat.

Aus Fig. 12 ergibt sich der Minimalwert der Spannung zu  $150 \pm 1$  Volt, stimmt also mit dem Kathodenfall bei  $l = 3$  mm bis auf 7 Volt überein. Viel zu niedrige Werte liefert dagegen die statische Messung, nämlich nach der letzten Kolonne bei Nr. 12 der Tabelle 1, einen um 29 Volt zu niedrigen Wert.

<sup>1)</sup> W. DÄLLENBACH, Phys. Zeitschr. **26**, 483, 1925. — A. GÜNTHERSCHULZE, Zeitschr. f. Phys. **30**, 175, 1924; **61**, 1, 1930.

<sup>2)</sup> P. BÄCHTIGER, Noch unveröffentlichte Diss. Basel.

Die Erklärung des Verlaufes der Sondencharakteristiken lässt sich nach dem Vorgehen von I. LANGMUIR (l. c.) zwanglos durchführen.

### § 11. Die Elektronengruppen und ihre Temperaturen.

$$\Delta l = 2 \text{ mm.}$$

Die Dreiteiligkeit der Sondencharakteristiken 2 der Fig. 6 und 1 der Fig. 7, welche im Abstände  $\Delta l = 2$  mm von der Anode gemessen werden, führt zu den drei folgenden Elektronengruppen:

I. *Primäre Elektronen.* Es handelt sich dabei um eine translatorisch bewegte Elektronenschar, welche aus dem Gebiete des Kathodenfalles herkommt. Wäre nur diese Gruppe allein, so würde sich die gestrichelte Kurve der Fig. 7 ergeben, welche eine Sättigung bei 29,8 Milliamp. zeigt. Überlagert man einer translatorisch bewegten Elektronengruppe eine ungeordnete Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, so kann man zeigen, dass sich eine S-förmige Sondencharakteristik vom Typus der beobachteten ergibt. Die Messwerte reichen leider zur Festlegung der Temperatur dieser Gruppe noch nicht aus. Dagegen lässt sich die maximale Voltgeschwindigkeit der schnellsten, noch bemerkbaren Elektronen angeben. Diese ist gleich der Differenz zwischen der Spannung, bei welcher die Sondencharakteristik ihren ersten Anstieg beginnt (nahe bei  $A$ ) und dem Raumpotential  $D$ , denn diese Potentialdifferenz mögen die schnellsten Elektronen gerade noch zu durchfliegen, bevor sie an die Sonde gelangen. Es ergibt sich dafür der Wert 20 Volt (s. Fig. 7). Während bei I. LANGMUIR die primären Elektronen im Abstände 3 cm von der Kathode nahezu eine Voltgeschwindigkeit aufweisen, die dem ganzen Kathodenfall gleichkommt, erreicht dieselbe im vorliegenden Falle nur 14% des Kathodenfalles (143 Volt). Dieser Unterschied ist leicht zu verstehen aus der Druckdifferenz; während I. LANGMUIR bei 0,0002 mm Druck arbeitet, herrscht im vorliegenden Falle ein Druck von 260 mm. Die Elektronen werden deshalb im Glimmbogen sehr viele, bremsende Zusammenstöße mit Molekülen erleiden, bevor sie an die Sonde gelangen. Interessant ist, dass sich überhaupt im Glimmbogen 1 mm vor der Kathode noch eine solche primäre Elektronengruppe nachweisen lässt.

II. *Sekundäre Elektronen.* Das sind zerstreute primäre, oder aus Molekülen abgesprengte Elektronen. Der Nachweis dieser Gruppe möge an einem Zahlenbeispiel erläutert werden. In Tabelle 2 findet sich in Kolonne 1 und 2 die aus Fig. 7 entnommene Sondencharakteristik. Der gegen die Sonde fließende Elektronen-

strom  $I_0$  wird erhalten, indem man zu  $I$  den positiven Ionenstrom von 0,8 Milliamp. addiert. Dieser entspricht dem negativen  $I_s$  bei grossen Werten von  $U_a$ .

Tabelle 2,  $\Delta l = 2$  mm.

$U_a$ Volt	$I_0$ $I + 0,8$	$I_1$ Milli- amp.	$I_0 - I_1$	$\log_{10} (I_0 - I_1)$			
90	26,4	25,0	1,4	0,16	II. Gruppe $T_2 = 45000$ K		
89	27,9	26,0	1,9	0,27			
88	29,0	26,6	2,4	0,38			
87	30,5	27,5	3,0	0,48			
86	31,8	28,0	3,8	0,58			
85	33,6	28,5	5,1	0,71			
84	35,5	29,0	6,5	0,81			
83	37,5	29,2	8,3	0,92			
82	40,0	29,5	10,5	1,02			
81	43,5	29,7	13,8	1,14			
80	48,4	29,8	18,6	1,27	17,3	1,3	0,11
79,5	53,0	29,8	23,2	1,37	19,9	3,3	0,52
79	58,8	29,8	29,0	1,46	22,4	6,6	0,82
78,8	62,0	29,8	32,2	1,51	23,4	8,8	0,94
78,5	68,4	29,8	38,6	1,59	25,7	12,9	1,11
78,2	82,5	29,8	52,7	1,72	27,6	25,1	1,40

In Kolonne 3 ist die Stromstärke  $I_1$  der primären Gruppe, in Kolonne 4 sind die übrig bleibenden Elektronen  $I_0 - I_1$  angeführt. Haben diese eine Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, so muss die Beziehung zwischen  $I_0 - I_1$  und  $U_a$  eine Exponentialfunktion sein von der Form:

$$I_0 - I_1 = C e^{-\frac{(U_a - D)e}{kT}} \quad (1)$$

$C$  bedeutet dabei eine Konstante,  $e$  die Elementarladung,  $k$  die Boltzmann'sche Konstante und  $T$  die Elektronentemperatur. Da die logarithmierte Kurve eine Gerade sein muss, wird in Kolonne 5 der Tabelle 2  $\log_{10}(I_0 - I_1)$  angegeben, welches in Fig. 13 als Funktion von  $U_a$  aufgetragen ist (Kurve 1).

Man erkennt aus Fig. 13, dass die Kurve bis zum Punkte  $A$  tatsächlich geradlinig ist. Die sekundären Elektronen haben also Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung. Für den Tangens des Neigungswinkels der Geraden gilt:

$$\frac{\Delta \log_{10} (I_0 - I_1)}{\Delta U_a} = \frac{eM}{kT} \quad (2)$$

$M$  ist der Modul und hat den Betrag 0,434. Setzt man die Zahlenwerte in (2) ein, so ergibt sich für die Elektronentemperatur  $T$ :

$$T = 5030 \frac{\Delta U_a}{\Delta \log_{10} (I_0 - I_1)} \quad (3)$$

Die Gerade in Fig. 13 führt auf  $T_2 = 45\,000^\circ \text{K}$ .

III. Die Abweichung der beobachteten Kurve von der Geraden oberhalb  $A$  in Fig. 13 führt zu einer III. Gruppe von Elektronen, die ebenfalls Maxwell'sche Geschwindigkeit aufweist. In Tabelle 2, 5. Kolonne, sind die Stromwerte  $I_2$  der II. Gruppe oberhalb  $A$

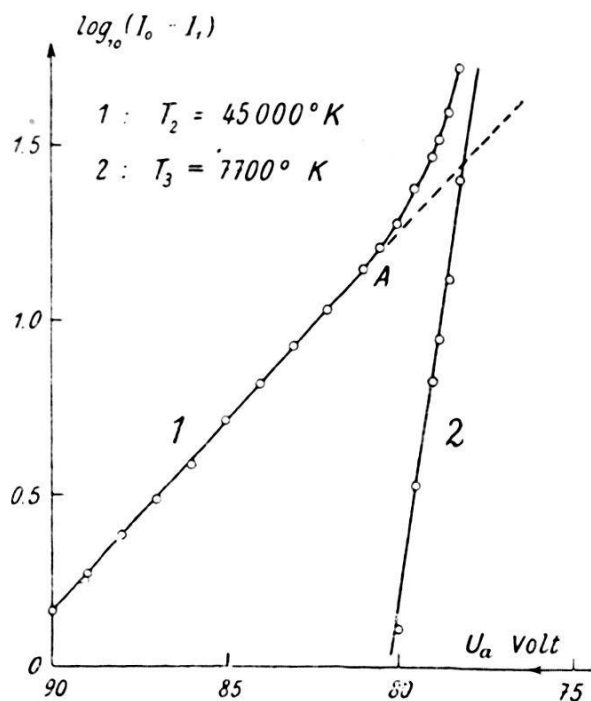


Fig. 13.  $\Delta l = 2 \text{ mm}$ .

eingetragen, deren Logarithmen dem extrapolierten gestrichelten Teile der Kurve 1 entnommen werden. Die 7. Kolonne enthält die Stromstärke  $I_3$  der 3. Gruppe und die letzte Kolonne die  $\log_{10} I_3$ , welche die Gerade 2 der Fig. 13 und die Temperatur  $T_3 = 7700^\circ \text{K}$  ergeben.

$$\Delta l = 1,5 \text{ mm.}$$

In diesem Abstände ergibt sich nur noch eine primäre Elektronengruppe von 7 Milliamp. Sättigungsstrom. Diese ist in Fig. 7 gestrichelt eingezeichnet. Die berechneten Logarithmen der Differenz  $I_0 - I_1$  sind in Fig. 14 als  $\circ$  angegeben und liegen auf der Geraden 1. Die 3. Gruppe ist nicht mehr vorhanden, d. h. es existiert nur eine Gruppe sekundärer Elektronen mit der Temperatur  $T_2 = 79800^\circ \text{K}$ .

$$\Delta l = 1 \text{ mm.}$$

Hier ist nur noch eine Gruppe sekundärer Elektronen vorhanden; die primäre Gruppe fehlt.

In Fig. 14 ist der Logarithmus des Elektronenstromes  $I_0$ , entnommen aus Fig. 7, als Funktion von  $U_a$  aufgezeichnet (Kurve 2). Die Beobachtungspunkte liegen im ganzen Intervalle von 45 bis 85 Volt auf einer Geraden, d. h. auch diese Gruppe hat eine Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung. Die zugehörige Elek-

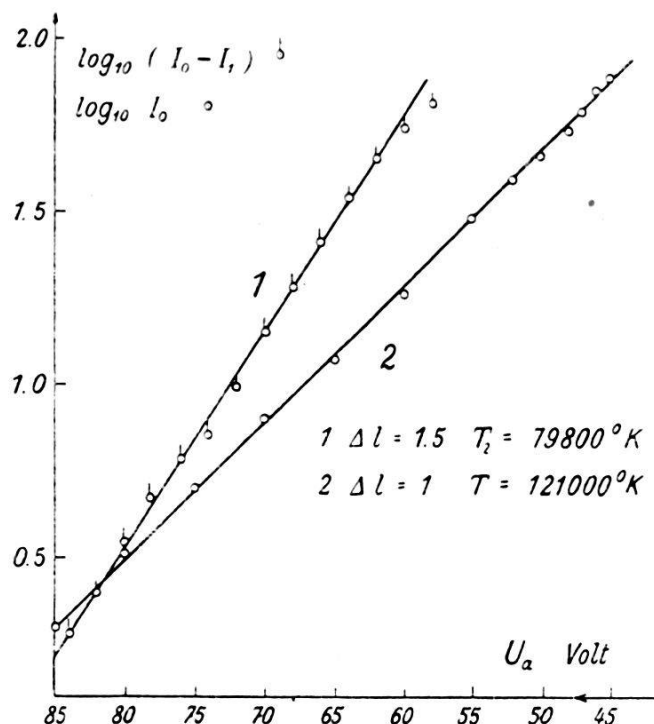


Fig. 14.

tronentemperatur  $T$  hat den hohen Wert von  $121000^\circ K$ . Die mittlere Voltgeschwindigkeit  $\bar{V}$  nach der Gleichung:

$$e \cdot \bar{V} = \frac{3}{2} k T \quad (4)$$

erreicht mit dem Werte 15,7 Volt nahezu die Ionisierungsspannung des Stickstoffes (16 Volt). Da die Sondencharakteristiken direkt die Energieverteilungskurve der Elektronen darstellen, kann aus denselben die Zahl der Elektronen, welche zu ionisieren vermögen, d. h. die Geschwindigkeit 16 Volt überschreiten, abgelesen werden. Es ergibt sich aus Fig. 7 in allen 3 Abständen  $\Delta l$  nahezu 20 Milliamp., d. h. etwa  $\frac{1}{4}$  aller Elektronen, welche auf die Sonde gelangen, kann den  $N_2$  ionisieren.

Es möge hier auf eine Fehlerquelle hingewiesen werden, welche die Sondencharakteristik beeinflusst. Nahe am Punkte  $D$ ,



wo viele rasche Elektronen auf die Sonde treffen, werden diese an der Sonde durch Sekundäremission neue Elektronen erzeugen. Dieser Effekt verschiebt die Sondencharakteristik nach unten zu kleinern  $I_S$ -Werten, genau wie die oben studierte Glühemission. Der beeinflusste Teil liegt jedoch nur nahe bei  $D$ , d. h. es werden mehr Elektronen kleiner Geschwindigkeit da sein, als die gemessenen Kurven ergeben.

In Tabelle 3 sind die Resultate zusammengestellt.

**Tabelle 3 (Elektronengruppen).**

Nr.	$\Delta l$ mm	Gruppe I	Elektronentemperatur		$V_{\max}$	Fig.
			Gruppe II	Gruppe III		
1	2	30 Milliamp.	43 000 <sup>0</sup> K	11 000 <sup>0</sup> K	23 Volt	—
2		30 „	45 000 <sup>0</sup> „	8 000 <sup>0</sup> „	20 „	7
3	1,5	7 „	79 800 <sup>0</sup> „	—	37 „	7
4		7 „	78 200 <sup>0</sup> „	—	41 „	—
5	1	—	121 000 <sup>0</sup> „	—	40 ÷ 50	7
6	—	—	95 000 <sup>0</sup> „	33 000 <sup>0</sup> „		Langmuir

Nr. 1 und 4 sind zwei weitere, in der Arbeit nicht näher angeführte Messreihen. Die 3. Kolonne enthält die gesamte Stromstärke der gerichteten Elektronengruppe, Kolonne 6 die sicher feststellbare maximale Voltgeschwindigkeit  $V_{\max}$ . Nr. 6 enthält zum Vergleiche die Elektronentemperaturen von I. LANGMUIR.

I. LANGMUIR (l. c.) schreibt, dass die III. Gruppe diejenige ist, welche normalerweise in der positiven Säule der Entladungen gefunden wird. Ich glaube nicht, dass das der Fall ist, sondern die normalerweise gefundene Elektronengruppe entsteht aus beiden, sowohl der II. als auch der III. Gruppe. Eine scharfe Trennung dieser beiden Gruppen dürfte kaum möglich sein, sondern das Vorhandensein der III. Gruppe sagt lediglich aus, dass dort die ungeordneten Elektronen noch keine Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung haben, sondern eine solche, welche sich sehr gut durch 2 Gruppen Maxwell'scher Geschwindigkeit beschreiben lässt. Die Trennung der Gruppen II und III dient lediglich zur einfachen Darstellung der Verhältnisse. Da die alleinige ungeordnete Gruppe in Abstand  $\Delta l = 1$  und  $1,5$  mm eine noch höhere Temperatur aufweist als die II. Gruppe bei  $\Delta l = 2$  mm, so steht sie im vorliegenden Falle der II. Gruppe

näher als der III<sup>1)</sup>). Dass im Quecksilber- und in den von W. B. NOTTINGHAM untersuchten Bogen die primäre Gruppe nicht gefunden wird, ist leicht zu verstehen wegen dem kleinen Kathodenfall bzw. dem hohen Drucke. Die primäre Gruppe wird um so mehr in die Entladung hineingehen, je grösser der Kathodenfall und je kleiner der Gasdruck ist. Eine Bestätigung dieses Gesetzes bilden die in § 5 erwähnten, mit umgepolter Entladung gemessenen Sondencharakteristiken. Dabei ist der Kathodenfall bei demselben Drucke beträchtlich kleiner (etwa 50 Volt) und die primäre Gruppe hat deshalb im Abstände 1 mm von der Kathode nur noch eine Gesamtstromstärke von 10 Milliamp. gegen 30 Milliamp. nach Tabelle 3.

E. LÜBCKE<sup>2)</sup> erwähnt im Quecksilberbogen ebenfalls 2 Gruppen von Elektronen, wahrscheinlich solche, welche der II. und III. Gruppe entsprechen. K. EMELÉUS und W. BROWN (l. c.) beobachten in der Glimmentladung bei niedrigen Drucken ebenfalls 3 Gruppen. In wiefern es sich bei ihrer primären Gruppe um gerichtete Elektronen handelt, konnte ich leider nicht entscheiden.

Zum Schlusse ist es mir eine angenehme Pflicht, meinen besten Dank auszusprechen, Herrn Prof. Dr. A. HAGENBACH für die gütige Überlassung der Institutsmittel, meinem Freunde Dr. E. FREY für tätige Mithilfe und dem ALUMINIUMFONDS NEUHAUSEN, aus welchem ein Teil der Apparate angeschafft werden konnte.

Basel, Physikalische Anstalt der Universität.

---

<sup>1)</sup> Eine feinere Trennung der translatorischen I. Gruppe von den ungeordneten Gruppen lässt sich erreichen mit einer flachen Sonde, deren Oberfläche gegen die Bogenachse gedreht werden kann. Dabei ändert sich die wirkende Sondenfläche in bezug auf die gerichteten, dagegen nicht in bezug auf die ungerichteten Elektronen.

<sup>2)</sup> E. LÜBCKE, Zeitschr. f. techn. Phys. **10**, 601, 1929.